الفصل الثاني

النشاط الإشعاعي والإشعاعات
Radioactivity and radiation

مقدمة – تفكك ألفا – تفكك بيتا – إشعاعات جاما – التفكك الإشعاعي– السلاسل الإشعاعية الطبيعية – النشاط الإشعاعي المستحث – وحدات قياس النشاط الإشعاعي – أسئلة ومسائل.

2–1 مقدمة

تتميز الكثير من النظائر – سواء الطبيعية أو الاصطناعية (أي المجهزة باستخدام المفاعلات أو المعجلات النووية)– بخاصية تعرف باسم النشاط الإشعاعي (radiaoactivity).

والنشاط الإشعاعي عبارة عن تفكك Decay (أو اضمحلال Disintegration) تلقائي لنواة النظير مع إصدار جسيمات نووية مثل جسيمات ألفا أو بيتا، قد يتبعها انطلاق إشعاعات جاما. وتعرف النظائر التي يحدث فيها هذا التفكك أو الاضمحلال بالنظائر المشعة. وتجدر الإشارة إلى أن عملية التفكك تحدث في النظائر سواء أكانت في صورة نقية أم تدخل ضمن مركبات كيميائية أو بيولوجية أو غيرها. كما أن عملية التفكك لا تعتمد إطلاقاً على الظروف الطبيعية مثل الحرارة وحالة النظير ..الخ.

2–2 تفكك ألفا α - decay

تتميز نوى العناصر الثقيلة (الأثقل من الرصاص) بانخفاض قيمة طاقة الترابط لكل نيوكلون في النواة. لذلك، فإن هذه النوى غير مستقرة، وتتفكك إلى نوى أخف وأكثر استقراراً. فعلى سبيل المثال، نجد أن نواة اليورانيوم $^{238}_{92}U$ التي تتكون من 92 بروتونا، 146 نيوترونا تتفكك إلى نواة الثوريوم $^{234}_{90}Th$ المكونة من 90 بروتونا، 144 نيوترونا وينبعث نتيجة هذا التفكك جسيم ألفا α، الذي هو عبارة عن نواة الهليوم والمكون من بروتونين ونيوترونين. وتمثل عملية التفكك هذه بالمعادلة التالية:

$$^{238}_{92}U \longrightarrow\ ^{234}_{90}Th +\ ^{4}_{2}He\ (\alpha)$$

وهكذا، يتكون نتيجة تفكك نواة اليورانيوم نواة جديدة أكثر استقراراً هي نواة الثوريوم مع إصدار جسيم ألفا. كذلك، نجد أن نواة البولونيوم $^{214}_{82}Po$ تتفكك إلى نواة الرصاص $^{214}_{82}Pb$ مع إصدار جسيم ألفا، أي أن:

$$^{218}_{84}Po \longrightarrow\ ^{214}_{82}Pb + \alpha$$

ولكي تكون النواة مشعة لجسيم ألفا يجب أن تكون كتلتها أكبر من مجموع كتلتي النواة الوليدة (daughter nucleus) وجسيم ألفا (يطلق اسم النواة الأم Parent nuvleus على النواة المشعة التي تتفكك، في حين يطلق اسم النواة الوليدة على النواة الناتجة عن التفكك). أي أنه كي تستطيع النواة الأم أن تتفكك بإصدار جسيم ألفا يجب أن يتحقق الشرط التالي:

$$M_p - (M_d + M_\alpha) > 0 \qquad (2\text{-}1)$$

حيث M_p كتلة النواة الأم، M_d كتلة النواة الوليدة، M_α كتلة جسيم ألفا. ولا يتحقق هذا الشرط إلا لنوى بعض العناصر الأثقل من الرصاص وعدد محدود جدا من العناصر الأخف من الرصاص. أما نوى العناصر الأخف فإنها تكون مستقرة بالنسبة لإصدار جسيمات ألفا.

وتجدر الإشارة إلى أن طاقة جسيمات ألفا الصادرة عن نظير معين تتخذ قيمة واحدة. ولكن إذا تكونت النواة الوليدة في حالات مختلفة الإثارة فعندئذ تكون طاقات جسيمات ألفا مختلفة ولكنها ذات قيم محددة. فمثلاً

نجد أن طاقة جسيمات ألفا الصادرة عن نظير البولونيوم 210 تتخذ قيمة واحدة هي 5.305 ميغا إلكترون فولت. أما جسيمات ألفا الصادرة عن اليورانيوم 238 فتتخذ قيمتين هما 4.198 ميغا إلكترون فولت، 4.149 ميغا إلكترون فولت. ويعود السبب في ذلك إلى أن نواة الثوريوم 234 الوليدة قد تتكون في الحالة الأرضية فتتخذ جسيمات ألفا القيمة الأكبر للطاقة، وقد تتكون هذه النواة الوليدة في حالة مثارة فتتخذ جسيمات ألفا القيمة الأصغر للطاقة. ويمكن حساب طاقة جسيمات ألفا الصادرة من نظير معين وذلك باستخدام علاقة أينشتين لتكافؤ الكتلة والطاقة، حيث أن الطاقة E الناتجة عن التفكك هي:

$$E = \{ (M_p - (M_d + M_\alpha) \} C^2 \qquad (2\text{-}2)$$

وتتوزع هذه الطاقة بين جسيم ألفا والنواة الوليدة بنسب معاكسة لكتلتيهما وذلك طبقا لقانون بقاء الزخم (قانون بقاء كمية الحركة)، أي أن جسيم ألفا يحمل الجزء الأكبر من الطاقة الناتجة عن التفكك في حين تحمل النواة الوليدة جزءاً صغيراً جداً من هذه الطاقة. ويسهل حساب طاقة جسيمات ألفا E_α بدلالة طاقة التفكك E وكتلة النواة الوليدة M_d وكتلة النواة الأم M_p ، وذلك بتطبيق قانونا بقاء الزخم والطاقة الحركية، حيث يتبين أن:

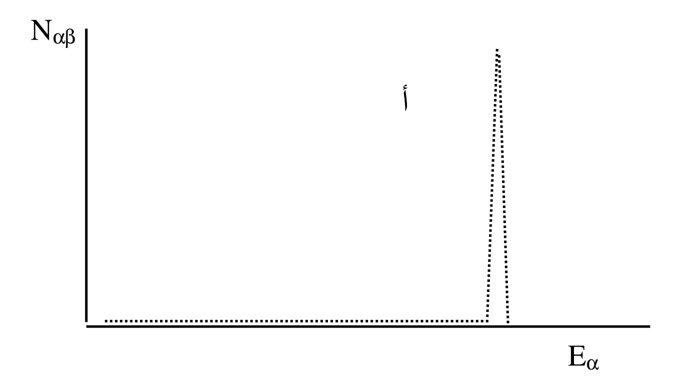
$$E_\alpha = (M_d / M_p) E \qquad (2\text{-}3)$$

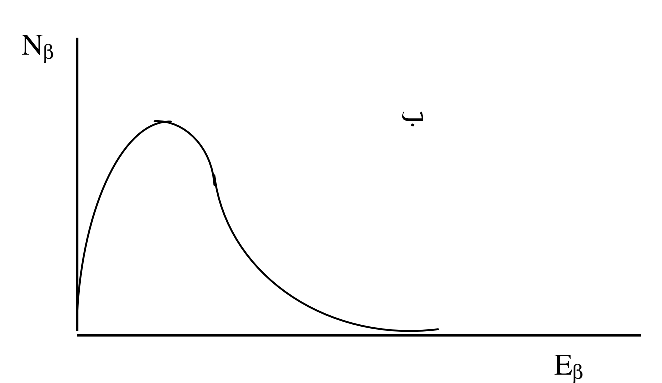
وحيث أن كتل النوى ثابتة، وطاقة التفكك ثابتة بالنسبة لكل نواة تكون طاقة جسيمات ألفا الصادرة عن النظير المعين واحدة عندما تتفكك النواة الأم إلى نواة وليدة في الحالة الأرضية، وقد تتخذ طاقات هذه الجسيمات قيما متعددة لكنها محددة عندما تتكوّن النواة الوليدة في حالات مثارة مختلفة. لذلك يقال أن طيف جسيمات ألفا هو طيف محدد الطاقات ويختلف من نظير لآخر، ويعتبر بصمة من البصمات التي تميز هذا النظير دون غيره. ويبين شكل (2–1أ) مخططا لمثل هذا الطيف.

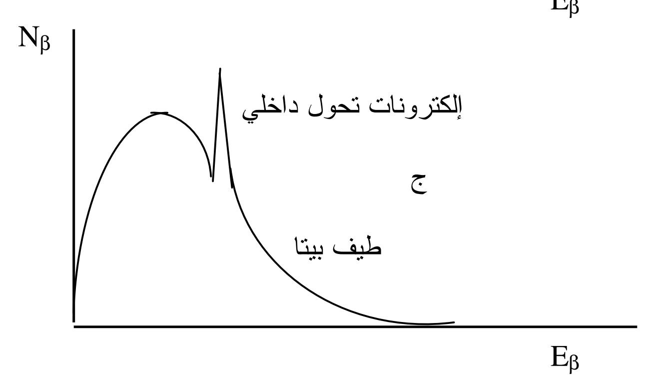
2–3 تفكك بيتا β - decay

تصدر نوى بعض النظائر المشعة جسيمات أخرى تعرف باسم جسيمات بيتا (β - particles). وهذه الجسيمات عبارة عن إلكترونات أو

بوزيترونات. والبوزيترون (positron) عبارة عن جسيم كتلته مساوية تماما لكتلة الإلكترون ولكن شحنته موجبة. ويحدث هذا النوع من التفكك (المعروف باسم تفكك بيتا) للنوى في كثير من النظائر سواء أكانت ثقيلة أم خفيفة.







شكل (2-1): أ- طيف ألفا ب- طيف جسيمات بيتا
ج- طيف جسيمات بيتا + إلكترونات تحول داخلي

فمن المعروف أنه كي يكون النظير مستقراً بالنسبة لإصدار جسيمات بيتا يجب أن تكون النسبة بين عدد النيوترونات والبروتونات (أي N/Z) في نواة هذا النظير نسبة معينة تتراوح بين 1 بالنسبة للنظائر الخفيفة وتزداد حتى تصل إلى حوالي 1.6 بالنسبة للنظائر الثقيلة. فمثلاً يلاحظ أن نواة نظير الكربون 12 ($^{12}_{6}C$) مستقرة حيث أن نسبة النيوترونات إلى البروتونات فيها هي $N/Z = 6/6 = 1$. وتعتبر هذه النواة من النوى الخفيفة. أما نواة نظير الكربون 14($^{14}_{6}C$) فهي نواة غير مستقرة حيث إن هذه النسبة تصبح:

$$N / Z = 8/6 = 1.33$$

كذلك، يلاحظ أن نواة نظير السيزيوم 133 ($^{133}_{55}Cs$) مستقرة لأن النسبة تصبح 1.42 في حين أن نواة نظير السيزيوم 137($^{137}_{55}Cs$) غير مستقرة لأن النسبة تصبح 1.49. ويوضح شكل (2−2) منحنى الاستقرار بالنسبة لتفكك بيتا. وهذا المنحنى عبارة عن العلاقة بين عدد النيوترونات N وعدد البروتونات Z للنظائر المستقرة. فإذا كانت النسبة بين عدد البروتونات والنيوترونات للــنظير المعــين واقعة على منحنى الاستقرار كان النظير مستقراً بالنسبة لتفكك بيتا. وأما إذا خرجت هذه النسبة عن المنحنى فإن النظير يكون نشطاً بالنسبة لهذا التفكك.

كذلك، يمكن أن يكون النظير المعين مستقراً بالنسبة لتفكك ألفا ولكنه غير مستقر بالنسبة لتفكك بيتا والعكس صحيح. فمثلاً تعتبر نواة اليورانيوم 238 مستقرة بالنسبة لتفكك بيتا (أي أنها لا تتفكك مصدرة جسيم بيتا)، ولكنها غير مستقرة بالنسبة لتفكك ألفا (أي تتفكك مع إصدار جسيم α) . ونتيجة لإصدارها جسيم α تتكون نواة جديدة هي الثوريوم 234. وعند حساب النسبة N/Z لليورانيوم 238 نجدها:

$$N / Z = 146 / 92 = 1.587$$

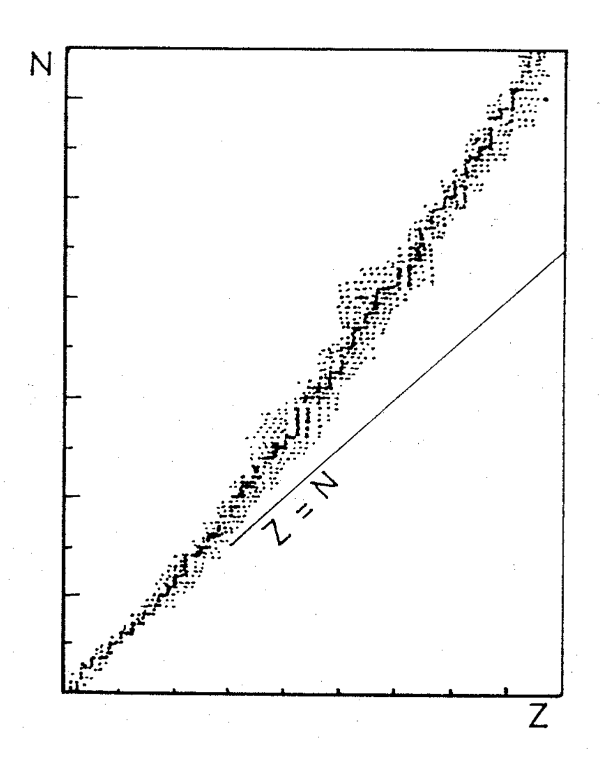
أما بالنسبة للثوريوم 234 نجد أن النسبة هي:

$$N / Z = 144 / 90 = 1.60$$

أي أن نسبة النيوترونات إلى البروتونات خرجت عن منحنى الاستقرار. لذا، نجد أن نواة الثوريوم تصبح غير مستقرة بالنسبة لتفكك بيتا مع إصدار جسيم بيتا. ويعبر عن هذا التفكك كالتالي:

$$^{234}{}_{90}Th \longrightarrow {}^{234}{}_{91}Pa + \beta^-$$

أي أن نواة الثوريوم 234 تتفكك إلى نواة بروتكتينيوم 234 مع إصدار جسيم بيتا سالب (إلكترون). ويلاحظ أنه نتيجة لهذا التفكــك زاد عدد البروتونات داخل النواة بمقدار بروتون واحد، في حين قــل عــدد النيوترونات بمقدار نيوترون واحد فتصبح نسبة N/Z في البروتكتينيــوم هي 1.571 ، وهي تحقق الاستقرار بالنسبة لتفكك بيتا.



شكل (2-2)
منحنى الاستقرار بالنسبة لتفكك بيتا

2-3-1 أنواع تفكك بيتا Types of β-decay

أ- التفكك الإلكتروني The electron decay

يلاحظ أن إصدار إلكترون من النواة ناتج عن تحول نيوترون من نيوترونات النواة إلى بروتون، وذلك كي تصبح النسبة بين النيوترونات والبروتونات هي نسبة الاستقرار. ويعبر عن هذا التفكك كالآتي:

$$ {}^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{1}_{1}p + \beta^{-} $$

ومن أمثلة التفكك الإلكتروني تفكك الكوبلت 60 (^{60}Co) إلى النيكل 60 (^{60}Ni) وتفكك السيزيوم 137 (^{137}Cs) إلى الباريوم 137 (^{137}Ba).

ب- التفكك البوزيتروني The positron decay:

في بعض الأحيان تكون نسبة النيوترونات إلى البروتونات في النظير المعين أقل من النسبة التي تحقق الاستقرار. وفي هذه الحالة يتحول أحد بروتونات النواة إلى نيوترون، وينطلق نتيجة لذلك التحول بوزيترون يحمل شحنة البروتون الموجبة. ويعرف تفكك بيتا في هذه الحالة بالتفكك البوزيتروني، ويعبر عنه كالآتي:

$$ {}^{1}_{1}P \longrightarrow {}^{1}_{0}n + \beta^{+} $$

ومن أمثلة التفكك البوزتروني تفكك الصوديوم 22 (^{22}Na) إلى النيون 22 (^{22}Ne).

ج- الأسر الإلكتروني The electron capture

يمكن أن يحدث تحول أحد بروتونات النواة إلى نيوترون بطريقة أخرى بخلاف المذكورة في التفكك البوزتروني. ويتم ذلك بأن تأسر النواة إلكتروناً من الإلكترونات المدارية القريبة من النواة (أي من المدار K وفي أحيان قليلة من المدار L) ويتحد هذا الإلكترون المأسور مع أحد بروتونات النواة فيتكون النيوترون دون إصدار جسيم بيتا. ويعرف تفكك بيتا في هذه الحالة بالأسر الإلكتروني ويعبر عنه كالآتي:

$$^{0}_{-1}e + ^{1}_{1}P \longrightarrow ^{1}_{0}n$$

وهكذا فإنه يوجد ثلاثة أنواع لتفكك بيتا هي التفكك الإلكتروني (β^-) والبوزيتروني (β^+) والأسر الإلكتروني (electron capture). وفي حالة الأسر الإلكتروني لا تصدر النواة أيا من جسيمات بيتا.

ولقد ثبت فيما بعد أنه عند حدوث أي نوع من تفكك بيتا ينطلق من النواة جسيمات تعرف باسم النيوترونيو (neutrino) – ν (نيو) . والنيوترينو عبارة عن جسيم متعادل الشحنة وكتلة السكون له مساوية للصفر (أي $m_\nu=0$) . وعلى هذا يمكن التعبير عن الأنواع الثلاثة لتفكك بيتا كالآتي:

$$^{1}_{0}n \longrightarrow ^{1}_{1}P + \beta^- + \nu' \quad \text{(تفكك إلكتروني)}$$

$$^{1}_{1}P \longrightarrow ^{1}_{0}n + \beta^+ + \nu \quad \text{(تفكك بوزيتروني)}$$

$$^{0}_{-1}e + ^{1}_{1}P \longrightarrow ^{1}_{0}n + \nu \quad \text{(أسر إلكتروني)}$$

ويعرف ν' باسم النيوترينو المضاد(anti - neutrino). وعموما، يعرف الجسيم المضاد على أنه هو الذي إذا تلاقى مع جسيمه عند تحركهما بسرعة محدودة نسبيا فإنهما يفنيان معا ككتلة مادية وينتج عن هذا الفناء طاقة في شكل إشعاعات كهرومغناطيسية (إشعاعات جاما أو أشعة سينية).

ويمكن معرفة ما إذا كان النظير المعين مستقرا أو غير مستقر بالنسبة لأي نوع من تفكك بيتا. فإذا تحقق الشرط:

$$^{A}_{Z}M > (^{A}_{Z+1} M + m_e) \qquad (2\text{-}4)$$

حيث $^{A}_{Z} M$ ، $^{A}_{Z+1}M$ ، m_e هي كتل النواة الأم والنواة الوليدة والإلكترون بالترتيب، تكون النواة نشطة بالنسبة لإصدار الإلكترونات. وإذا تحقق الشرط:

$$^{A}_{Z} M > (^{A}_{Z-1} M + m_e) \qquad (2\text{-}5)$$

حيث $^{A}_{Z-1}M$ ، هي كتلة النواة الوليدة في حالة التفكــك البــوزيتروني، تكون النواة نشطة بالنسبة لإصدار البوزيترونات. وأخيراً فإنه لكي تكون النواة نشطة بالنسبة للأسر الإلكتروني يجب أن يتحقق الشرط:

$$(m_{e} + {}^{A}_{Z}M) > {}^{A}_{Z-1}M \qquad (2\text{-}6)$$

فإذا تحقق الشرط (2−5) نجد أن الشرط (2−6) قد تحقــق هــو الآخر. لذلك، فإن أي نواة نشطة بالنسبة لإصدار البوزيترونات تكون في الوقت نفسه نشطة بالنسبة للأسر الإلكترونــي. لــذلك، فــإن التفكــك البوزيتروني يصاحبه دائماً نسبة معينة من الأسر الإلكتروني والعكــس غير صحيح. فإنه يمكن أن يتحقق الشرط (2−6) دون أن يتحقق الشرط (2−5). عندئذ، نجد أن النواة نشطة بالنسبة للأسر الإلكتروني ولكنهــا غير نشطة بالنسبة لإصدار البوزيترونات.

2−3−2 طاقة جسيمات بيتا **Energy of β- particles**

ذكرنا أن طاقة جسيمات ألفا الصادرة عن نظير معين تتخذ قيمة واحدة أو قيما محددة للطاقة. وأما بالنسبة لجسيمات β الصادرة عن نفس النظير فإن طاقاتها يمكن أن تتخذ أي قيم للطاقة، اعتبارا مــن الصــفر وحتى قيمة قصوى معينة لكل نظير. ويرجع السبب في ذلك إلــى أنــه بالإضافة إلى جسيم بيتا الصادر عن النظير المشع يَصدر جسيم آخر هو النيوترينو المضاد أو النيوترينو. فطاقة تفكك بيتا الناتجة بالنسبة للتفكك الإلكتروني تكون ثابتة، ويمكن تحديدها بالعلاقة:

$$E = \{ {}^{A}_{Z}M - ({}^{A}_{Z+1}M + m_{e})\} C^{2} \qquad (2\text{-}7)$$

وفي حالة التفكك البوزيتروني تكون الطاقة الناتجة من التفكــك ثابتة كذلك وهي:

$$E= \{ {}^{A}_{Z}M - ({}^{A}_{Z-1}M + m_{e})\} C^{2} \qquad (2\text{-}8)$$

وتتوزع طاقة التفكك في كلتا الحالتين بين الجســيمين النــاتجين وهما الإلكترون والنيوترينو المضاد في حالة التفكك الإلكتروني، أو بين البوزيترون والنيوترينو في حالة التفكك البوزيتروني. وفي حالة الأســر الإلكتروني تكون الطاقة الناتجة عن التفكك ثابت أيضا للنظيــر المعــين وهي:

$$E = ({}^{A}_{Z}M - {}^{A}_{Z-1}M)\, C^2 \qquad (2\text{-}9)$$

وتوزيع الطاقة بين الجسيمين الناتجين عن كل تفكك غير محدد بنسبة معينة. فقد تكون طاقة النيوترنيو المضاد قريبة جدا من الصفر وبذلك يحمل الإلكترون (في التفكك الإلكتروني) كل طاقة التفكك وتعرف طاقة الإلكترون عندئذ بالطاقة القصوى للتفكك أو طاقة نقطة النهاية (end point). وقد يحمل النيوترنو المضاد جزءا أكبر من طاقة التفكك فيحمل الإلكترون الجزء الباقي من هذه الطاقة. كذلك، قد يحمل النيونرينو المضاد طاقة التفكك كلها فتكون طاقة الإلكترون قريبة من الصفر. وعند قياس طاقة الإلكترونات الصادر عن عدد كبير جدا من النوى المشعة ورسم العلاقة بين عدد الإلكترونات ذات الطاقة المعينة وبين طاقاتها يمكن الحصول على طيف جسيمات بيتا الذي يمثله منحنى شبيه بالمبين في شكل (2−1ب).

ويعرف هذا المنحنى باسم طيف أشعة بيتا وهو يوضح أن طاقة جسيمات بيتا الصادرة عن نظير معين يمكن أن تتخذ أية قيمة، ابتداءً من الصفر وحتى أقصى قيمة وهي قيمة طاقة التفكك أو ما يعرف باسم نقطة النهاية. لذا، فإنه يقال أن طيف جسيمات بيتا عبارة عن طيف مستمر على عكس طيف جسيمات ألفا الذي يتخذ قيمة واحدة أو قيما محددة.

2−4 إشعاعات جاما Gamma radiation

في اغلب الأحيان تكون النوى الوليدة الناتجة عن تفكك ألفا أو تفكك بيتا (أوالنوى الناتجة عن أية عملية نووية أخرى كالتفاعلات النووية في حالة مثارة أو متهيجة excited state). ويعني هذا أن طاقة مكونات النواة تكون أعلى من طاقتها في الحالة الأرضية (المستقرة)، أي أن كتلة النواة في الحالة المثارة تكون أكبر من كتلتها في الحالة الأرضية (ground state). عندئذ، تنتقل النواة من الحالة المثارة إلى حالة أقل إثارة أو إلى الحالة الأرضية للتخلص من طاقة الإثارة، وذلك بإصدار إشعاعات كهرومغناطيسية تعرف باسم إشعاعات جاما. كما يمكن أن تتخلص النواة من طاقة الإثارة بتجميع هذه الطاقة الزائدة

وتركيزها على أحد الإلكترونات المدارية (خاصة المدار K لقربه مـــن النواة) فينطلق هذا الإلكترون تاركا الذرة وحاملا معه قيمة محددة مـــن الطاقة. وتعرف هذه العملية باسم التحول الداخلي (internal conversion)

وتجدر الإشارة إلى أن إزالة الإثـــارة عـــن طريـــق إصـــدار إشعاعات كهرومغنيطيسية (إشعاعات جاما) يمكن أن يحدث بانتقال النواة من الحالة المثارة مباشرة إلى الحالة الأرضية. كذلك، يمكن أن يحـــدث الانتقال على مراحل كأن تنتقل النواة من الحالة المثارة إلى حالـــة أقـــل إثارة ثم إلى حالة أقل ... وهكذا، إلى أن تصل النواة للحالة الأرضـــية. فعلى سبيل المثال، فإنه عند حدوث تفكك بيتا لنواة الصوديوم 22 سواءً عن طريق التفكك البوزيتروني أو عن طريق الأسر الإلكتروني تتكـــون نواة عنصر جديد هو النيون 22، وفقا للتفكك البوزتروني التالي:

$$^{22}{}_{11}Na \longrightarrow {}^{22}{}_{10}Ne^{*} + \beta^{+}$$

أو وفقا لتفكك الأسر الإلكتروني:

$$e^{-} + {}^{22}{}_{11}Na \longrightarrow {}^{22}{}_{20}Ne^{*}$$

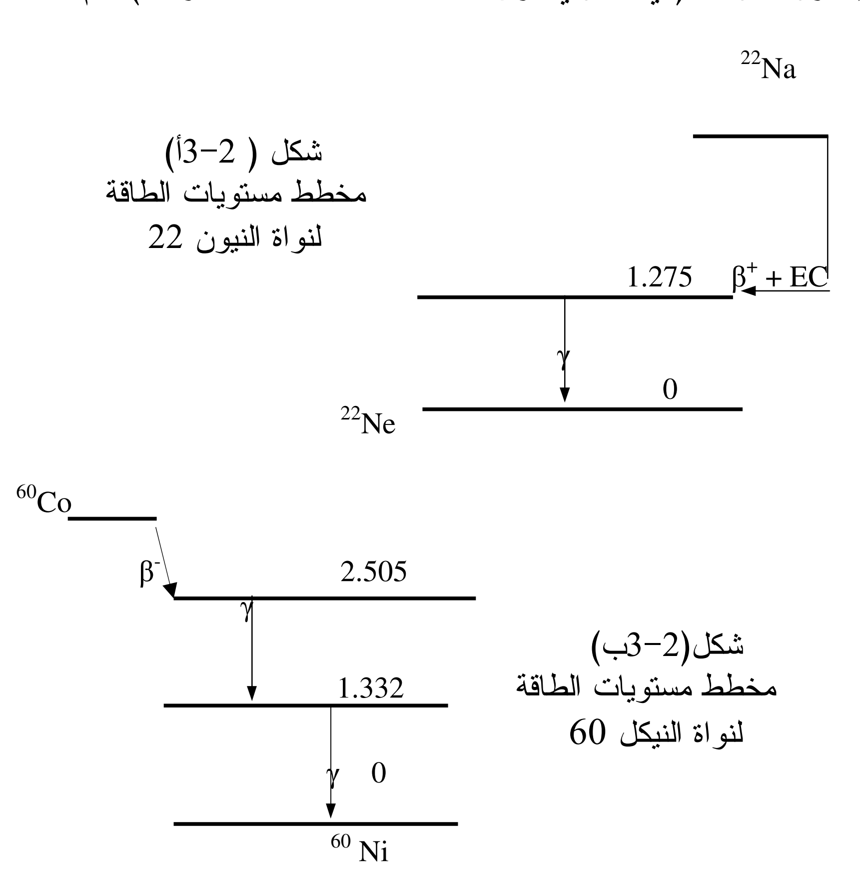
والعلامة * معناها أن نواة النيون في حالة مثارة، حيث يتكـــون النيون 22 في نمطي التفكك في حالة مثارة بطاقة إثارة مقدارها 1.275 ميغا إلكترون فولت. ثم تضمحل نواة النيون 22 من الحالة المثارة إلـــى الحالة الأرضية مع إصدار إشعاع جاما (فوتون جاما) طاقته مســـاوية لطاقة الإثارة. ويبين شكل (2–3أ) مخططا لهذه العملية.

ويمثل مخطط تفكك واضمحلال الكوبالـــت 60 (شـــكل2–3ب) مثالا للتحول من الحالة المثارة إلى الحالة الأرضية على مراحل . فعنـــد تفكك نواة الكوبالت 60 وإصدار الإلكترون تتحول إلى نـــواة نيكـــل60 لمعادلة التفكك البيتاوي التالية:

$$^{60}{}_{27}Co \longrightarrow {}^{60}{}_{28}Ni^{*} + \beta^{-} + \acute{\upsilon}$$

وتكون نواة النيكل في الحالة المثارة الرابعة بطاقة إثارة مقدارها 2.505 ميغا إلكترون فولت. فتنتقل (تضمحل) نواة النيكل 60 من هذه الحالة إلى الحالة المثارة الأولى مباشرة بطاقة إثارة أقل وهي 1.332

ميغا إلكترون فولت مع إصدار فوتون جاما بطاقة مقدارها 1.173 ميغا إلكترون فولت (أي تساوي فرق الطاقة بين الحالتين المثارتين). ثم تنتقل



شكل (2−3أ)
مخطط مستويات الطاقة
لنواة النيون 22

شكل(2−3ب)
مخطط مستويات الطاقة
لنواة النيكل 60

نواة النيكل من الحالة المثارة الأولى إلى الحالة الأرضية مع إصدار فوتون جاما بطاقة مقدارها 1.332 ميغا إلكترون فولت. وبصفة عامة تكون طاقة فوتون جاما E_γ نتيجة انتقال النواة من حالة مثارة ابتدائية i إلى حالة نهائية f أقل إثارة مساوية للفرق بين طاقتي الحالتين وتحدد بالعلاقة:

$$E_\gamma = E_i - E_f = h\nu$$

حيث E_i ترمز لطاقة الحالة الابتدائية للنواة، E_f ترمـــز لطاقـــة الحالة النهائية، h هو ثابت بلانك ($h = 6.63 \times 10^{-34}$ جول.ثانيـــة)، ν تردد الفوتون.

2-4-1 التحول الداخلي The internal conversion

سبق الإشارة إلى أنه في بعض الأحيان ينتج عن اضمحلال جاما انطلاق أحد إلكترونات القشرات K أو L أو M الذرية دون أن يخـــرج فوتون جاما المنبعث من النواة خارج الذرة. في هذه الحالـــة لا يســـجل فوتون جاما كناتج لاضمحلال جاما وإنما يسجل إلكترون بطاقة محـــددة تساوي طاقة فوتون جاما مطروحا منها طاقة تـــرابط الإلكتـــرون فـــي القشرة المحددة.

وتعرف الإلكترونات المنطلقة من القشرة K أو L أو M نتيجـــة لاضمحلال جاما للنـــواة بإلكترونـــات التحـــول الـــداخلي وتظهرهـــذه الإلكترونات في صورة خط طيفي رفيع محدد الطاقة للإلكترونات فـــوق طيف الإلكترونات الناتجة عن تفكك بيتا شكل (2-1ج). فعلـــى ســـبيل المثال يتفكك الذهب 198 من خلال تفكك بيتا السالب إلى الزئبـــق 198 في حالته المثارة الأولى، بصفة أساسية، بطاقة إثارة 412 ك إ ف. وعند اضمحلال الزئبق 198 إلى الحالة الأرضية ينطلق فوتون جاما حـــاملا فرق الطاقة وهو 412 ك إ ف. ويمكن أن يتفاعل هـــذا الفوتـــون عنـــد انطلاقه مع أحد الإلكترونات المدارية القريبة من النواة مثل إلكترونـــات القشرة K أو L أو M فيمنحه كل طاقته (راجع الفصل الثالث) فيســـتهلك الإلكترون جزءا من هذه الطاقة على فك ترابطه بالنواة وينطلق حـــاملا الجزء الباقي من الطاقة، وتعرف العملية عندئذ بـــالأثر الكهروضـــوئي الداخلي أي في نفس الذرة التي انطلق منها الفوتون.

كذلك، يمكن أن تنطلق طاقة الإثارة من النواة لأحد الإلكترونات مباشرة دور انطلاق فوتون جاما بشرط أن يكون هذا الإلكترون قريبـــا من النواة أي من الإلكترونات التي تنتمي للقشـــرة K أساســـا، وأحيانـــا للقشرة L ،وأحيانا نادرة للقشرة M. ويعرف اضمحلال النواة، عندئـــذ،

بأنه اضمحلال جاما من خلال إلكترونات التحول الداخلي .ولا تختلــف طاقة هذه الإلكترونات الناتجة عن التحول الداخلي عن طاقة إلكترونات الأثر الكهرضوئي للفوتون المنطلق من النواة. لــذلك يســتحيل فصــل إلكترونات التحول الداخلي عن إلكترونات الأثر الكهروضوئي الداخلي . وتكون طاقتهم هي

$$E_e = E_\gamma - Be$$

حيث E_e طاقة الإلكترون المنطلق، E_γ طاقة فوتون جاما أو فرق طاقتي الإثارة الذي حدث الإضمحلال بينما،B_e طاقة الترابط للإلكترون.

وفي حالة الزئبق 198 تكون طاقة ترابط الإلكترون في القشــرة K هي 83 ك إ ف. بذلك تكون طاقة إلكترونات التحول من هذه النــواة هي:

$$E_e = 412 - 83 = 329 \quad KeV$$

وذلك بالنسبة للإلكترونات المنطلقة من القشرة K . أماعند انطلاق الإلكترونات من القشرة L (وهو الحتمال الأصغر)، وحيث أن طاقة ترابط الإلكترون في هذه القشرة للذهب تبلغ حوالي8.9 ك إ ف، تكون طاقة إلكترونات التحول الداخلي من القشرة L هي:

$$E_e = 412 - 8.9 = 403.1 \quad KeV$$

وهذان الخطان من الإلكترونات وحيدة الطاقة يظهــران عــادة فوق الطيف المستمر لجسيمات بيتا.

وعند انطلاق أحد إلكتروني القشرة K (أو أي من الإلكترونات الثمانية للقشرة L فإنه يترك مكانه فارغا، ويقال عندئذ أن هناك فجوة في القشرة K أو L أو حتى M . وبالتالي، تبدأ الإلكترونات الموجودة فــي المدرات الأبعد من النواة بشغل هذه الفجوة، ويحدث نتيجة لذلك انطلاق أشعة سينية تحمل فرق الطاقة بين المستويين كما سيرد لاحقا.

ويعرف الاحتمال النسبي لحدوث التحول الداخلي من القشــرة K α_k على أنه نسبة عدد الإلكترونات المنطلقة من القشــرة K إلــى عــدد

فوتونات جاما المنبعثة من نفس العينة من هذه النوى. وعموما، تتغير قيمة معامل التحول الداخلي α_k بين صفر ، 1 وتزيد قيمته عموما بزيادة العدد الذري Z للنواة. وتحدد معاملات التحول الداخلي بالنسبة للقشرات L ، M بنفس الأسلوب إلا أن هذه المعاملات تقل كثيرا بالنسبة لمعاملات القشرة K .

وهكذا، نجد أن هناك العديد من النظائر التي تتميز بنشاط إشعاعي طبيعي. وتتفكك هذه النظائر مصدرة إما جسيمات ألفا أو بيتا أو كليهما معا، وقد يتبع ذلك مباشرة أو خلال فترة زمنية معينة انطلاق إشعاعات جاما نتيجة اضمحلال النويات الوليدة من الحالات المثارة إلى حالات أقل إثارة أو إلى الحالةالأرضية.

2-5 الأشعة السينية X - rays

تصدر الأشعة السينية عن الذرة بخلاف جسيمات ألفا وبيتا وإشعاعات جاما التي تصدر عن النواة. ويجب التفريق بين نوعين مختلفين من الأشعة السينية يختلفان من حيث أسلوب توزع طاقة الأشعة وهما:

2-5-1 الأشعةالسينية المميزة للعنصر

يصدر هذا النوع من الأشعة السينية عند انتقال الإلكترونات الذرية من مدارات (قشرات) ذات طاقة أعلى إلى مدارات ذات طاقة أقل في الذرة نفسها. فعند وجود فجوة إلكترونية في مدار ذي طاقة أقل ينتقل أحد الإلكترونات من مدار ذي طاقة أعلى ليشغل هذه الفجوة، وينطلق في اللحظة نفسها فوتون أشعة سينية (موجة كهرومغناطيسية) حاملاًفرق طاقتي الإلكترون في المداين. ولما كانت قيم طاقات الإلكترونات في المدارات الذرية محددة وثابتة للعنصر الواحد وتختلف من عنصر لآخر، فإنه تتخذ فوتونات الأشعة السينية المنطلقة نتيجة لانتقال الإلكترونات بين المدارات قيما محددة وثابتة للطاقة بالنسبة للعنصر الواحد، وتختلف هذه القيم باختلاف العنصر. وهذا يعني أنه عند إثارة الإلكترونات في مدارات ذرات العنصر الواحد بأي أسلوب من

أساليب الإثارة تصدر ذرات هذا العنصر (لحظة التخلص من الإثـــارة) فوتونات سينية ذات طاقات محددة ومعلومة ومميزة للعنصـــر. ويطلـــق علىهذه الأشعة اسم الأشعة السينية المميزة للعنصر وتعد بصـــمة مـــن بصماته، وتستخدم عادة في عمليات التحليل الكمي والكيفي للعناصر.

وتوسم الأشعة السينية المميزة للعنصر المعين بمنحهـــا نفـــس الرمز الخاص بالقشرة التي ينتقل إليها الإلكترون. فعلى سبيل المثـــال، فإنه عند انتقال الإلكترون من القشرة L إلى القشرة K توسم هذه الأشعة بالحرف K . أما عند انتقال الإلكترون من القشرة M إلـــى القشـــرة L فتوسم الأشعة السينية بالحرف L . ولا يقتصر التوسيم على ذكر رمـــز القشرة التي ينتقل إليها الإلكترون وإنما يؤخذ فـــي الحســـبان، كـــذلك، المستويات الفرعية لنفس القشرة التي يتم الانتقال منها وكذلك المستويات الفرعية التي يتم الانتقال إليها. فعندالانتقال من القشرة الفرعيـــة الأبعـــد (أي الأعلى طاقة) وهي القشرة L_3 إلى القشرة K توسم بـــالرمز $K_{\alpha1}$ ، والأشعة المميزة للانتقال من القشرة الفرعية L_2 إلى القشرة K توســـم بالرمز $K_{\alpha2}$. ويبين شكل (2–4) مخططا للقشرات الفرعية (المـــدارات الفرعية للإلكترونات) ولتوسيم الأشعة الـــــسينية النـــــاتجةعن انتقـــال الإلكترونات بين هذه القشرات.

مثال:

إذا علمت أن طاقـــة تـــرابط الإلكترونـــات فـــي مـــدارات ذرة الرصاص هي كالمبينةفي الجدول التالي. فما هي طاقة أهـــم الخطـــوط الطيفية للأشعة السينية المميزة للرصاص.

القشرة	K 1S1/2	L1 2S1/2	L2 2P1/2	L3 2P3/2	M1 2S1/2	M2 2P1/2	M3 2P3/2
طاقة الترابط ك.ف	88.005	15.861	15.200	13.035	30851	30554	3.066

الحل:

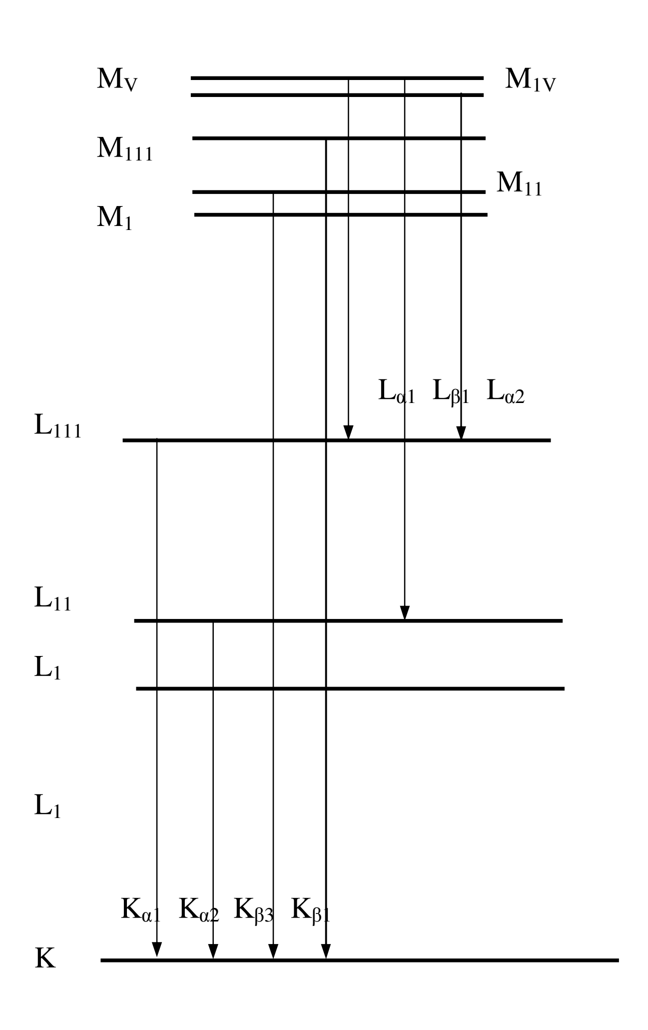
من المعروف أن $K_{\alpha 1}$ تنتج عن انتقال الإلكترون مـــن القشـــرة الفرعية L_3 إلى القشرة K . بذلك تكون طاقـــة الأشـــعة الســـينية مـــن الرصاص $_{82}Pb$ هي:

$K_{\alpha 1}$ (L_3 –> K) = 88.005 – 13.035 = 74.97 KeV

$K_{\alpha 2}$ (L_2 –> K) = 88.005 – 15.200 = 72.805 KeV

$K_{\beta 1}$ = (M_3 –> K) = 88.005 – 3.066 = 84.939 KeV

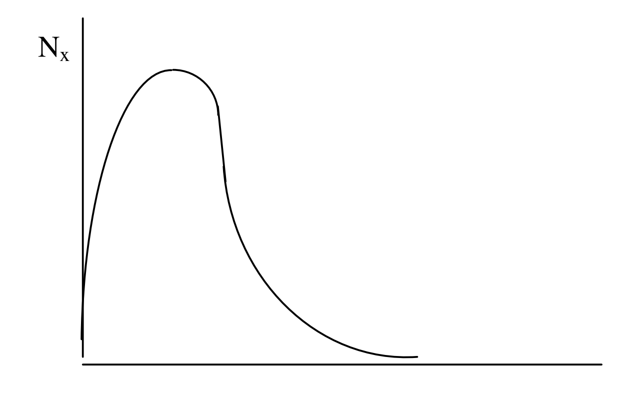
$K_{\beta 2}$ = (M_2 –> K) = 88.005 – 3.554 = 84.451 KeV



شكل (2–4)
القشرات والقشرات الفرعية للإلكترونات في الذرة وخطوط الأشعة الشينية المنبعثة عند انتقال الإلكترونات من القشرات الأعلى للأدنى

2–5–2 الأشعة السينية الانكباحية

عند حدوث انكباح شديد (أي تناقص شديد في السرعة) للإلكترون، أو لأي جسيم مشحون سريع بصفة عامة، بسبب تفاعل هذا الإلكترون أو الجسيم المشحون مع المجال الكهربائي الشديد للذرة أو للنواة تنطلق الطاقة التي يفقدها الإلكترون (أو الجسيم المشحون) بسبب تناقص سرعته في صورة فوتون أشعة سينية يحمل فرق طاقة الإلكترون أو الجسيم قبل وبعد التفاعل. وتسمى الأشعة المتولدة بهذا الأسلوب بالأشعة السينية الانكباحية. ويتميز طيف الأشعة الانكباحية شكل (2–5) بأنه طيف مستمر، أي تتخذ طاقة الفوتونات قيما مختلفة تبدأ من الصفر وتنتهي عند أقصى قيمة لطاقة الإلكترون أو الجسيم المنكبح. ومن أمثلة الأشعة السينية الانكباحية تلك الأشعة التي يتم توليدها في أنابيب الأشعة السينية المستخدمة في التشخص الطبي وفي التطبيقات الصناعية المختلفة، حيث يتم تعجيل الإلكترونات باستخدام فرق جهد كبير ثم تكبح الإلكترونات المعجلة علىمادة المصعد (الأنود) فتنطلق الأشعة الانكباحية.



شكل (2−5): طيف الأشعة السينية الانكباحية

3-5-2 إلكترونات أوجر Auger electrons

في الفقرة (2-5-1) السابقة ورد أنه عند حدوث فجـوة (أي فراغ إلكتروني) في إحد القشرات K أو L أو M فإنه يقـال أن الـذرة مثارة وأنها تعود إلى حالتها غير المثارة بهبوط أحد الإلكترونـات مـن المدار الأعلى ليشغل هذه الفجوة أو بهبوط عدد من الإلكترونـات مـن مدارات أعـلى إلى مـدارات أدنى لشـغل جميع المـدارات الأدنـى بالـعدد المقنن لها من الإلكترونات. وورد أن ذلك يترتب عليه انطلاق أشعة سينية مميزة تكون طاقة الفوتون لكل منها مساوية تمامـا لفـرق طاقتي القشرتين.

إلا أنه لايحدث في بعض الأحيان انطلاق للفوتون. فعلى سـبيل المثال لوحظ أنه عند وجود فجوة في القشرة K يمكن أن يهبط إلكتـرون من القشرة L ليشغل الفراغ الموجود في القشرة K ، عندئذ تتكون الفجوة في القشرة L مع انطلاق فوتون أشعة سينية مميزة. إلا أنه قد لايحـدث بعد ذلك هبوط إلكترون من قشرة أعلى لشغل الفجوة في القشرة L. وإنما يلاحظ انطلاق إلكترون آخر من القشرة التالية M ، بدلا مـن فوتـون الأشعة السينية. وبهذا تكون فجوة ثانية في القشـرة M. ويطلـق علـى الإلكترون المنطلق من القشرة M إلكترون أوجر. ويحمل هـذاالإلكترون طاقة E_e تساوي:

$$E_e = h\nu - E_M$$
$$= E_K - E_L - E_M$$

حيث $h\nu$ طاقة الفوتون الذي ينبغي أن ينطلق عند الانتقال من القشرة L إلى القشرة K.

وجدير بالذكر أن هذه العملية تشبه تماما عملية التحول الـداخلي الذي يتمخض عن انطلاق إلكترونات مدارية بدلا من فوتونـات جامـا المنبعثة من النواة. إلا أن إلكترون أوجر يعني تحول فوتون أشعة سينية إلى إلكترون وعدم انطلاق الفوتون وانطلاق إلكترون بدلا منه. ويطلـق على إلكترون أوجر في هذه الحالة إلكترون KLM ، لأنه بـدأ بوجـود

فجوة في القشرة K وانتهت العملية إلى انطلاق إلكترون من القشـــرة M بدلا من الفوتون الناتج عن انتقال الإلكترون من القشرة M إلى القشرة L

وتجدر الإشارة إلى إمكانية انطــلاق إلكترونـــات أوجــر مــن مستويات أعلى وتسمى عندئذ بثلاثة أحرف يمثل أيسرها القشرة الاقرب الى النواة التي تكونت فيها الفجوة وأيمنها القشرة التـــي انطلــق منهــا إلكترون مثل K L M أو غيرها.

ويبقى تعريف احتمال حدوث انطلاق إلكترونات أوجر ω_K على أنه النسبة بين عدد فوتونات الأشعة السينية المنطلقة من القشرة K إلى عدد الفجوات المتكونة في القشرة K .

6–2 التفكك الإشعاعي The radioactive decay

يعتبر التفكك الإشعاعي مع إصدار حسيم ألفا أو بيتا أو إشعاعات جاما عملية إحصائية خاضعة لقوانين الفيزياء الإحصائية، حيث أنه ليس بالإمكان توقع النواة أو النوى التي يمكن أن تتفكك في لحظـــة معينـــة. ويمكن إيجاد القانون الذي تتفكك بموجبه النوى انطلاقا مــن النظريـــة الإحصائية.

2–6–1 قانون التفكك الإشعاعي The radioactive decay law

نفرض أن (لامدا) هو عبارة عن احتمال تفكك نواة معينة فـــي ثانية واحدة، وأن هذا الاحتمال صغير جدا، أي أن:

$$0 < \lambda << 1$$

معنى ذلك أن احتمال تفكك هذه النواة خلال زمن قصير مقداره dt هـــو (λ dt) . فإذا كان عدد النوى النشطة التي لم تتفكك بعد هو N فهذا يعني أن احتمال التفكك لكل هذا العدد من النوى خلال الزمن dt هو $N \lambda dt$. أي أن عدد النوى الذي يمكن أن يتفكك خلال هذا الزمن هو:

$$dN = - N \lambda dt$$

وتعني الإشارة السالبة أن عدد النوى N المتبقي دون تفكك يقــل كلما زاد الزمن. وبقسمة طرفي هذه المعادلة الأخيرة على العدد N وأخذ تكامل الطرفين مع اعتبار أن عدد النوى النشطة عند الزمن $t = 0$ هو N_0 نجد أن :

$$N(t) = N_0\ e^{-\lambda t} \qquad (2\text{-}10)$$

حيث، N(t) هوعــدد النوى النشطة المتبقية دون تفــكك حتــى اللحظة t . وتعرف هذه العلاقة **بقانون التفكك الإشعاعي**، وتعرف الكمية λ **بثابت التفكك** (أو الاضمحلال)

2–6–2 الشدة الإشعاعية للعينة The sample activity

في معظم الأحيان يكون المطلوب هو معرفة عــدد النــوى A(t) التي تتفكك في الثانية، وليس عدد النوى المتبقية دون تفكــك والمحــددة بالعلاقة (2–10). ويعرف عدد النوى التي تتفكك في الثانية الواحدة من أي عينة مشعة باسم الشدة الإشعاعية لهذه العينة أو نشاطها الإشــعاعي (Activity of a Sample). ويسهل تحديد هذه الشدة وذلك بتفاضل المعادلة (2–10) بالنسبة للزمن، أي أن:

$$A(t) = dN(t) / dt$$
$$= \lambda N_0\ e^{-\lambda t} = \lambda N(t) \qquad (2\text{-}11)$$

وتعرف $A_0 = \lambda N_0$ بالشدة الإشعاعية عند اللحظة $t = 0$ ، لــذا فإن:

$$A(t) = A_0\, e^{-\lambda t} \qquad (2\text{-}12)$$

3–6–2 عمر النصف ومتوسط العمر The half-life and mean-life

عمر النصف (أو العمر النصــفي) للنظيــر المشــع المعــين هوعبارة عن الفترة الزمنية التي تنخفض خلالها الشده الإشعاعية لعينــة من هذا النظير إلى النصف. وبمعنى آخر فإن عمر النصف هو الــزمن اللازم لتفكك نصف عدد نوى العينة. ويرمز للعمر النصــفي، عمومــا،

بالرمز $t_{1/2}$. وباقتفاء هذا التعريف فإنه بوضـــع $N(t) = N_o/2$ ، $t = t_{1/2}$ في العلاقة (2–10) يتبين أن:

$$N_0 / 2 = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}}$$

ومنها يتبين أن:

$$t_{1/2} = \ln 2 / \lambda$$

$$= 0.693 / \lambda \qquad (2\text{-}13)$$

وحيث إن وحدة الزمن هي الثانية فإن وحدة قياس ثابت التفكك λ هي 1/ ثانية (أي ثانية$^{-1}$).

أما متوسط العمر لعينة مشعة والذي يرمز له عـــادة بـــالرمز τ (تاو) فهو عبارة عن مجموع أعمار جميع النوى العينة مقســـوما علـــى عددها ويسهل تحديده باستخدام العلاقة(2–10) كالآتي:

$$\tau = (1 / N_0 \int_0^\infty dN(t).t = 1/\lambda = t_{1/2} / 0.693 \qquad (2\text{-}14)$$

وهكذا نجد أن كلا من λ ، $t_{1/2}$ ، τ مرتبطـــة ببعضـــها بعلاقـــة بسيطة، ومعرفة إحداها يعين باقيها.

2–6–4 تعيين ثابت التفكك λ وعمر النصف $t_{1/2}$ عمليا

يمكن تحديد ثابت التفكك λ للعديد من النظائر المشعة باســتخدام القانون (2–12) والذي يمكن كتابته في الشكل التالي

$$\ln \{A(t) / A_0\} = -\lambda t$$

حيث يمثل الرمز (ln) لوغاريتم الأساس الطبيعـــي (e = 2.71). وعند استخدام لوغاريتم الأساس العشري تأخذ العلاقة الأخيـــرة الشـــكل التالي:

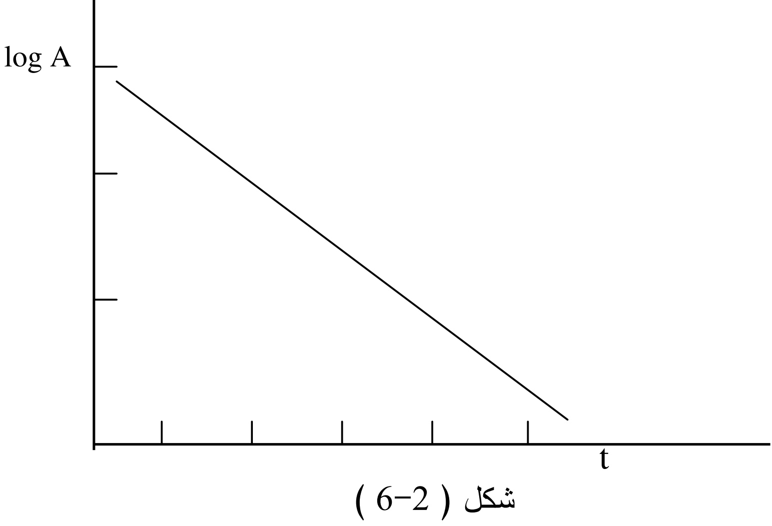
$$\log \{A(t) / A_0\} = -0.4343 \lambda t \qquad (2\text{-}15)$$

لأن لوغاريتم عدد ما للأساس العشري = 0.4343 لوغاريتم العدد نفسه للأساس الطبيعي، أي أن:

$$\log A(t) = \log A_0 - 0.4343\ \lambda\ t \qquad (2\text{-}16)$$

وهكذا، فإنه عند قياس الشدة الإشعاعية للعينة كدالة من الزمن ورسم العلاقة بين $\log\ A(t)$ والزمن t ، فإننا نحصل على خط مستقيم كالمبين في شكل (2−6) يبلغ ميله $S = -0.4343\ \lambda$. وبمقارنة الميل المحدد تجريبيا مع هذه القيمة الأخيرة يمكن تحديد قيمة ثابت التفكك λ. وبمعرفة ثابت التفكك يسهل إيجاد قيمة عمر النصف $t_{1/2}$ أو متوسط العمر τ لهذه العينة باستخدام العلاقات (2−13) و(2−14). ولقياس ثابت التفكك λ لعينة ما توضع هذه العينة على مسافة مناسبة من عداد الإشعاعات (الجهاز المستخدم لتسجيل عدد الإشعاعات) ويتم قياس معدل العد R (counting rate) خلال فترات زمنية متساوية. ويجب ملاحظة أن معدل العد R (وهو عبارة عن عدد الجسيمات المسجلة في وحدة الزمن) يتناسب مع الشدة الإشعاعية للعينة طالما أن وضع العينة بالنسبة للعداد لم يتغير طوال فترة إجراء التجربة أي أن:

$$R(t) / R_0 = A(t) / A_0$$



شكل (2−6)

العلاقة بين لوغاريتم الشدة الإشعاعية log A والزمن t

ولسهولة تحديد λ يستخدم ورق رسم بياني نصف لوغاريتمي حتى يستغنى عن استخراج قيمة اللوغاريتم في كل مرة. ولتحديد الميل تقسم عدد الدورات اللوغاريتمية على الزمن المقابل. ويمكن كذلك تحديد λ باستخدام العلاقة (2–16) مباشرة، حيث إن

$$\lambda = \{ \log A_0 - \log A(t) \} / 0.4343\, t$$

وفي هذه الحالة تختار نقطتان متباعدتان على المستقيم لتمثلا A_0 ، $A(t)$ ويكون t هو الفارق الزمني المقابل بين النقطتين المختارتين.

وتجدر الإشارة إلى أنه يمكن تحديد عمر النصف مباشرة، وذلك من العلاقة (2–12). فعند قياس معدل العد $R(t)$ كدالة ورسم العلاقة بين $R(t)$ حيث $[R(t) \alpha \; A(t)]$ والزمن t نحصل على منحنى كالمبين في شكل (2–7)، ومنه يمكن تحديد عمر النصف $t_{1/2}$ مباشرة، حيث إنه عبارة عن الزمن الذي تنخفض خلاله شدة العينة إلى النصف. ويلاحظ أنه خلال فترتي عمر نصف تصبح شدة العينة $(2/1)^2$ = (4/1) الشدة الأصلية، وخلال 7 فترات عمر نصف تصبح شدة العينة $(2/1)^7$ = (128/1)من الشدة الأصلية وخلال عشر فترات تصبح الشدة ($(2/1)^{10}$ = (1024/1) من الشدة الأصلية، أي أقل من 0.1 % من شدتها الأصلية . وهكذا فإنه بمرور الوقت تقل شدة العينة وتصبح قيمة مهملة بالنسبة للشدة الأصلية ولكنها لاتصل إلى الصفر.

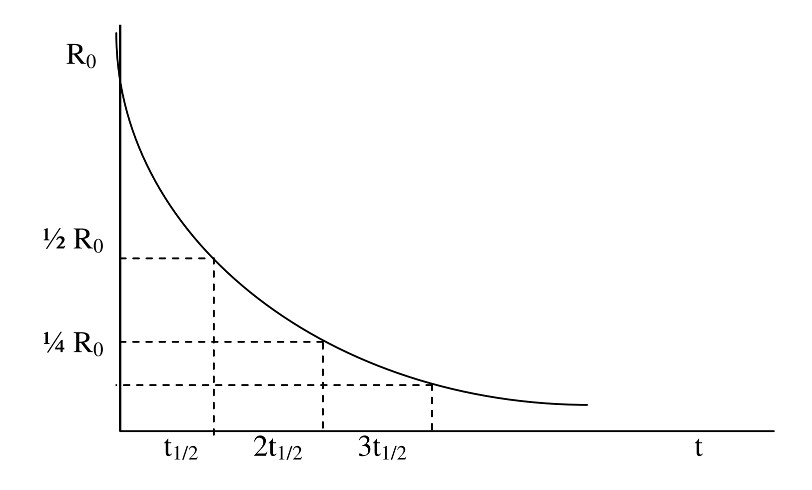
وتجدر الإشارة إلى أنه يمكن تحديد ثابت التفكك λ أو عمر النصف $t_{1/2}$ بهذه الطريقة بالنسبة للنظائر التي يتراوح عمرها النصفي بين عدة ثواني وعدة سنوات. أما بالنسبة للنظائر التي يبلغ عمرها النصفي قيما عالية(كاليورانيوم 238 مثلا والذي يبلغ عمره النصفي 4.468×10^9 سنة) فإنه لا يمكن تحديد إعمارها النصفية أو ثابت التفكك لها بهذه الطريقة حيث أن الانخفاض في الشدة الإشعاعية لها لا يكون محسوسا خلال زمن التجرية حى ولو استمر هذا الزمن عشرات السنين. لذا، فإنه لتحديد ثابت التفكك للنظائر ذات العمر النصفي

الطويل فإنه يجب معرفة عدد النويات النشطة الموجودة في العينة في لحظة معين. ولما كان:

$$|dN / dt| = \lambda N$$

$$= A = R / C$$

حيث C عبارة عن ثابت يحدد نسبة عدد الجسيمات التي يسجلها العداد إلى عدد جميع الجسيمات الصادرة من العينة، R هو معدل العد فإنه بمعرفة معدل العد R والثابت C وعدد النوى النشطة في العينة N يمكن تحديد ثابت التفكك λ وبالتالي حساب عمر النصف للنظير المعين.



شكل (2−7)

العلاقة بين معدل العد R(t) والزمن t

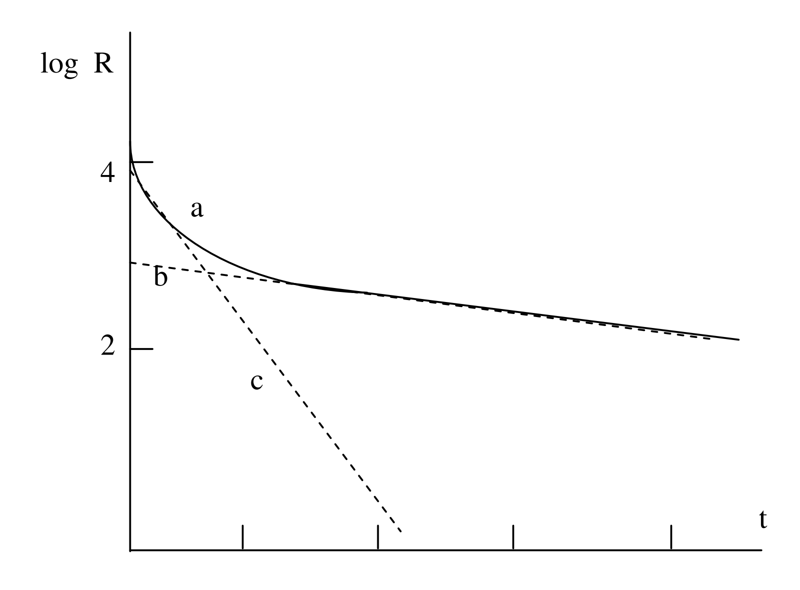
أما بالنسبة للنظائر ذات العمر النصفي الصغير فتستخدم طرق أخرى لتحديد أعمارهم النصفية.

2−6−5 تحديد العمر النصفي للنظائر المختلطة

يحدث أحيانا أن تكون العينة غير نقية وتحتوي على خليط من بعض النظائر المشعة المختلطة. فإذا كان الخليط مكونا من عدد محدود من النظائر المشعة (اثنين أو ثلاثة على الأكثر) واختلفت الأعمار

النصفية لهذه النظائر اختلافا ملموسا، فإنه يمكن تحديد العمر النصفي لكل نظير في المخلوط حتىعندما تكون الجسيمات الصادرة من النظائر المختلفة من النوع نفسه.

ولإجراء ذلك، يجب قياس معدل العد R(t) للعينة كدالة من الزمن ورسم العلاقة بين log R والزمن t . ولغرض الإيضاح نفرض أن العينة تحتوي على خليط من نظيرين فقط، وأن المنحنى المستمر a في الشكل (2-8) يحدد العلاقة بين log R ، t .



شكل(2-8)
العلاقة بين لوغاريتم معدل العد log R والزمن t
لعينة تحتوي على خليط من نظيرين فقط

ويلاحظ أن الجزء الأيمن من المنحنى في الشكل (2-8) يمثل خطا مستقيما وهو بمثابة خط التفكك بالنسبة للنظير ذي العمر النصفي الأكبر، حيث إن النظير الآخر أسرع تفككا لصغر عمره النصفي. وعند مد الجزء المستقيم من المنحنى a إلى اليسار نحصل على المستقيم b الذي يمثل التفكك بالنسبة للنظير الأطول عمرا. وبطرح المستقيم b من

المنحنى a نحصل على مستقيم آخر هو c الذي يعتبر بمثابة مستقيم التفكك للنظير الأقصر عمرا. وبتحديد الميل لكل مستقيم من هذين المستقيمين يمكن تحديد ثابت التفكك λ_1 ، λ_2 لكل نظير على حدة.

2-6-6 التفكك الإشعاعي المتتابع

The successive radioactive decay

عند تفكك النواة الأم إلى نواة وليدة فإنه قد تكون النواة الوليدة نشطة إشعاعيا. عندئذ تتفكك النواة الوليدة إلى ان نواة تعرف باسم الحفيدة (grand-daghter). وهكذا، تستمر العملية إلى تصل في النهاية إلى نواة مستقرة. وتعرف هذه العملية بالتفكك الإشعاعي المتتابع .

فعلى سبيل المثال تتفكك نواة الراديوم 226(عمرها النصفي 1.6×10^3 سنة) إلى الرادون 222. وتتفكك هذه الأخيرة (عمرها النصفي 3.82 يوم) إلى نواة البولونيوم 218، التي تعتبر هي الأخرى مشعة (عمرها النصفي 3.05 دقيقة). وهكذا تستمر العملية إلى أن تصل في النهاية إلى نواة الرصاص 206 المستقرة.

والغرض من دراسة التفكك المتتابع هو معرفة عدد الذرات (النوى) في كل عضو من أعضاء هذه السلسلة.

فإذارمزنا لعدد ذرات النويدة الأم عند الزمن t بالرمز N_1 وثابت التفكك لها بالرمز λ_1 ، وعدد ذرات النويدة الوليدة N_2 التي يعتبر بدورها نشطة وثابت التفكك لها هو λ_2 ، وعدد ذرات النويدة الحفيدة N_3 واعتبارها مستقرة، وإذا فرضنا أنه عند اللحظة $t = 0$ كان عدد ذرات كل جيل هو:

$$N_1 = N_{10}, \qquad N_2 = 0, \qquad N_3 = 0$$

أي أنه عند تحضير العينة كانت كلها من ذرات النويدة الأم، وباستخدام العلاقة (2−11)، والأخذ في الحسبان أن معدل تفكك النويدة الأم يساوي تماما معدل تكوين النويدة الوليدة، وأن معدل تفكك النويدة

الوليدة مساو لمعدل تكوين النويدة الحفيدة، فإنه يمكن التعبير عن العملية كلها بالمعادلات الثلاث التالية:

$$d N_1 / d t = - \lambda_1 N_1 \qquad (2\text{-}17)$$

$$d N_2 / d t = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \qquad (2\text{-}18)$$

$$d N_3 / d t = \lambda_2 N_2 \qquad (2\text{-}19)$$

وتحدد العلاقة (2–17) معدل التفكك بالنسبة للنويدة الأم وذلك طبقا للقانون الأساسي للتفكك الإشعاعي. وأما العلاقة (2–18) فتعني أن النويدة الوليدة تتكون بمعدل $N_1 \lambda_1$. في حين أن العلاقة (2–19) تحدد معدل تكوين الذرات الحفيدة المستقرة N_3.

وبحل مجموعة المعـــادلات (2–17)، (2–18)، (2–19) فإنـــه يمكن تحديد عدد ذرات كل نوع من الأعضاء الثلاثة للسلسلة كدالة مـــن الزمن t، وذلك كالآتي:

$$N_1 = N_{10}\, e^{-\lambda_1 t}$$

$$N_2 = \{ \lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1) \}\, N_{10} (e^{-\lambda 1 t} - e^{-\lambda 2 t}) \qquad (2\text{-}20)$$

$$N_3 = N_{10} [1 + \{\lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1)\}]\ e^{-\lambda 2 t} - \{\lambda_2 / (\lambda_2 - \lambda_1)\}\ e^{-\lambda 1 t}] \qquad (2\text{-}21)$$

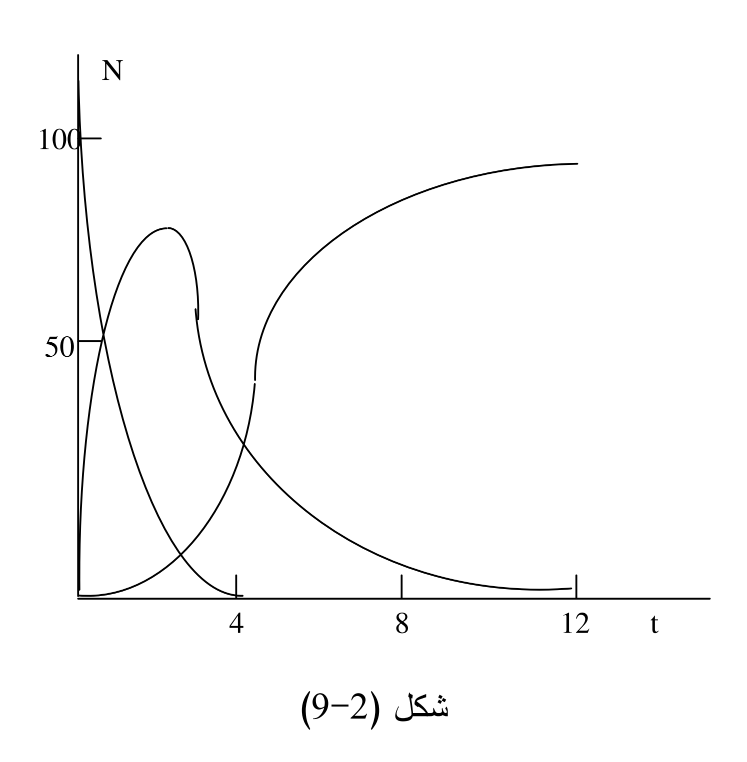
وهذه العلاقة صحيحة إذا كان $N_{20} = N_{30} = 0$ عند لحظةالصـــفر. أما إذا اختلف كل من N_{20} ، N_{30} عن الصفر فيصبح عدد الذرات الوليدة والحفيدة كدالة من الزمن هو:

$$N_2 = \{ \lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1) \}\, N_{10} (e^{-\lambda 1 t} - e^{-\lambda 2 t}) + N_{20}\, e^{-\lambda 2 t} \qquad (2\text{-}22)$$

$$N_3 = N_{30} + N_{20} (1 - e^{-\lambda 2 t}) + N_{10} [1 + \{ \lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1) \}\, e^{-\lambda 2 t} - \{ \lambda_2 / (\lambda_2 - \lambda_1) \}\, e^{-\lambda 1 t}] \qquad (2\text{-}23)$$

ويوضح شكل (2−9) كيفية تغير كل من N_1 ، N_2 ، N_3 كدالــة من الزمن للتفكك المتتابع لنظير الروثينيوم 105، حيــث يتفكــك إلــى الروديوم 105، وهذا الأخير يتفكك بدوره إلى البلاديوم 105 المستقر.

$$^{105}_{44}Ru \xrightarrow[t_{1/2} = 4.5\ h]{\beta^-} {}^{105}_{45}Rh \xrightarrow[t_{1/2} = 35\ h]{\beta^-} {}^{105}_{46}Pd$$



شكل (2−9)

تغير كل من عدد الذرات N_1 ، N_2 ، N_3 مع الزمن t
لنظير الروثينيوم 105

ويعبر المحور الرأسي عن عدد النوى الأم والوليــدة والحفيــدة عندما يكون عدد النوى الأم $N_{10}=100$ ،$N_{20} = N_{30} = 0$ ، في حين يعبــر المحور الأفقي عن الزمن بالساعة. ويلاحظ أن N_1 يتناقص أسيا طبقــا

لقانون التفكك الإشعاعي. أما N_2 فيكون صفرا عند $t = 0$ ثم يزداد طبقـــا للعلاقة (2–20) إلى أن يصل إلى أقصى قيمة عند زمن يساوي تقريبـــا ثلاثة أضعاف العمر النصفي ثم ينخفض من جديد.

أما بالنسبة للنوى الحفيدة N_3 فتكون أولا مساوية للصفر ثم تزداد ببطء كبير ولا تقترب من نهايتها (أي 100%) إلا بعد انقضـــاء زمـــن طويل (حوالي 5 أضعاف العمر النصفي للنظير الوليد).

2–6–7 التوازن الإشعاعي Radioactive equilibrium

عموما، فإن التوازن بالنسبة لأي كمية فيزيائية يعني أن هذه الكمية لا تتغير بالنسبة للزمن.

فإذا طبقنا هذا التعريف على جميع أعضاء سلسلة التفكك المتتابع فإن هذا يعني عدم تغير كل من N_1 ، N_2 ، N_3 بالنسبة للزمن، أي أن:

$$d N_1 / dt = d N_2 / d t = dN_3 / d t \qquad (2\text{-}24)$$

وبذلك فإن شروط التوازن للتفكك المتتابع هي:

$$d N_1 / d t = - \lambda_1 N_1 = 0 \qquad (2\text{-}25)$$

$$d N_2 / d t = 0 = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$$

أي أن

$$\lambda_1 N_1 = \lambda \lambda_2 N_2 \qquad (2\text{-}26)$$

وعموما، لا يمكن أن يحدث التوازن بمعناه الحرفـــي لأن هـــذا يعني بالنسبة للنواة الأم المشعة أن $\lambda \lambda_1 = 0$ (حيث N_1 لا تساوي صفرا). وهذا يعني أن النواة غير نشطة إشعاعيا وهو ما يتعارض مـــع النشـــاط الإشعاعي للنواة.

التوازن الأبدي The secular equilibrium

يمكن أن تتحقق حالات هي أقرب ما يمكن إلى التوازن. وتحـــدث هذه الحالات عندما تكون λ_1 صغيرة جدا وتقترب من الصـــفر (أي أن

العمر النصفي للنظير الأم كبيرجدا) في حين أن $\lambda_2 > \lambda_1$. عندئذ يسمى هذا النوع من التوازن بالتوازن الأبدي. وعندما يتحقق هذا النـــوع مـــن التوازن، فإنه بالتعويض عن λ_1 بقيم صغيرة في العلاقة (2−20)، تتخذ هذه العلاقة الشكل التالي:

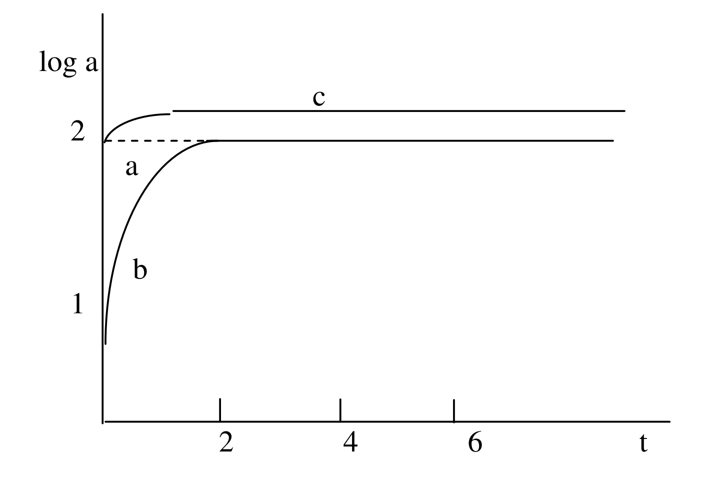
$$N_2 \cong (\lambda_1 / \lambda_2)\, N_{10}\, (1 - e^{-\lambda_2 t})$$

$$\lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_{10}\, (1- e^{-\lambda_2 t}) \qquad (2\text{-}27)$$

وتبين العلاقة(2−27) أنه بزيادة الزمن t يقترب الحد $e^{-\lambda_2 t}$ من الصفر، وبالتالي نجد أن:

$$\lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_{10} \qquad (2\text{-}28)$$

أي أنه يتحقق التوازن الأبدي حيث تصبح الشدة الإشعاعية للنوى الوليدة مساوية تماما للشدة الإشعاعية للنوى الأم. ويعكس شكل (2−10) صورة التوازن الأبدي حيث يبين الخط a الشدة الإشعاعية للنـــوى الأم وهي ثابتة وتساوي $\lambda_1 N_{10}$ (حيث إن العمر النصفي كبير جدا). أمـــا الشدة الإشعاعية للنوى الوليدة (المنحنى b) فهي تزداد بمرور الوقـــت إلى أن تصل لنفس القيمة الثابتة وهي $\lambda_1 N_1$. ويبين المنحنى c الشـــدة الإشعاعية الكلية لكلا النظيرين المتتابعين.



شكل (2−10): التوازن الأبدي

ويمكن استخدام التوازن الأبدي لقياس ثابت التفكك λ_1 للنظائر ذات العمر النصفي الكبير وذلك باستخدام العلاقة (2−28). ولهذا الغرض، يجب معرفة ثابت التفكك λ_2 للنظير الوليد ذي العمر النصفي الصغير، وعدد ذرات النظير الأم ونسبة وجود النوى (الذرات) الأم مع النوى الوليدة بعد حدوث التوازن وبذلك يسهل تحديد قيمة λ.

مثال:

ملح من أملاح اليورانيوم 238 وجد أنه يحتوي على نسبة ضئيلة جدا من الراديوم 226 وهذا الراديوم يتكون نتيجة للتفكك المتتابع لليورانيوم 238. فإذا كانت هذه النسبة هي عبارة عن ذرة واحد لكل 2.8×10^6 ذرة يورانيوم، وإذا علمت أن العمر النصفي للراديوم هو 1620 سنة فما هو العمر النصفي لليورانيوم.

الحل:

من قانون الاتزان الأبدي:

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2$$

أي أن:

$$N_1 / N_2 = \lambda_2 / \lambda_1 = t_1 / t_2$$

حيث ، يرمزان للعمر النصفي لليورانيوم والراديوم بالترتيب، وبالتعويض في طرفي العلاقة الأخيرة فإن:

$$2.8 \times 10^6 \times 1620 = 1 \times t_1$$

أي أن:

$$t_1 = 4.54 \times 10^9 \text{ years}$$

التوازن الانتقالي The transient equilibrium

يوجد نوع آخر من التوازن يعرف باسم التوازن الانتقالي (transient equilibrium). ويحدث هذا النوع من التوازن عندما يكون ثابت التفكك λ_1 للنظير الأم أصغر من ثابت التفكك λ_2 للنظير الوليد (أي أن $\lambda_1 < \lambda_2$) ولكن λ_1 ليست قريبة من الصفر (أي أن العمر النصفي للنظير الأم ليس كبيرا). في هذه الحالة لا يمكن اعتبار أن $\lambda_1 = 0$. ومع ذلك فإن الحد الأسي $e^{-\lambda_2 t}$ يقترب من الصفر أسرع من الحد $e^{-\lambda_1 t}$. لذلك، فإنه بعد مرور زمن كاف يحدث التوازن الانتقالي وتتخذ العلاقة (2–20) الشكل التالي:

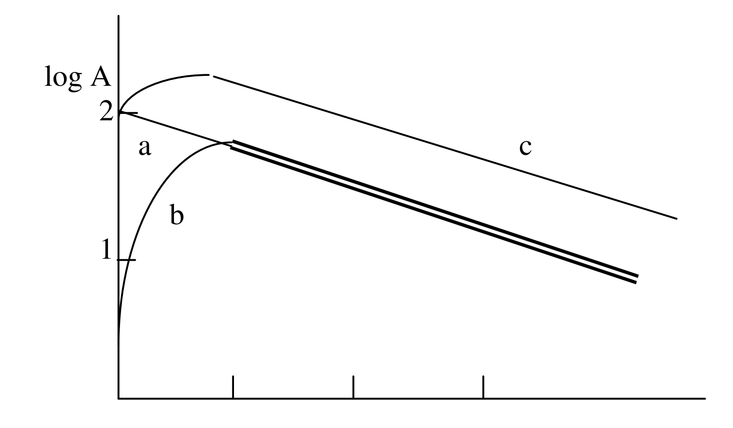
$$N_2 = \{ \lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1)\} N_{10}\, e^{-\lambda_1 t}$$

$$= \{ \lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1)\} N_1 \qquad (2\text{-}29)$$

وهذا يعني أن النوى الوليدة تتفكك بنفس معدل تفكك النوى الأم. وبذلك، تكون النسبة بين الشدة الإشعاعية A لكل من النوى الأم والنوى الوليدة هي:

$$A_1 / A_2 = \lambda_1 N_1 / \lambda_2 N_2 = (\lambda_2 - \lambda_1) / \lambda_2 \qquad (2\text{-}30)$$

وتبين هذه العلاقة أن الشدة الإشعاعية للنوى الوليدة تصبح بعد فترة زمنية معينة أكبر من الشدة الإشعاعية للنوى الأم. وهذا ما يوضحه شكل (2–11) الذي يبين الشدة الإشعاعية لكل من النوى الأم والنوى الوليدة كدالة في الزمن t إذا كان عدد النوى الوليدة عند $t = 0$ مساويا للصفر.



2 4 6 t

شكل (2–11): التوازن الانتقالي

2–7 السلاسل الإشعاعية الطبيعية
The natural radioactive series

تتميز نوى جميع النظائر ذات العدد الذري الأكبر من 82 بأنها جميعا غير مستقرة إشعاعيا، وذلك بسبب زيادة عدد البروتونات في النواة مما يجعل قوى التنافر الكهروستاتيكية كبيرة. ويؤدي هذا بدوره إلى تفكك بعض تلك النظائر من خلال تفكك ألفا وإصدار جسيمات ألفا. ونتيجة لإصدار هذه الجسيمات تزداد نسبة النيوترونات إلى البروتونات في النواة مما يؤدي إلى استيفاء شروط تفكك بيتا في بعض هذه النوى الوليدة وحدوث هذا التفكك مع إصدار الإلكترونات (جسيمات بيتا). وتوجد في الطبيعة ثلاث مجموعات تعرف بسلاسل الإشعاع الطبيعية وهي سلسلة الثوريوم ^{232}Th ، وسلسلة اليورانيوم – راديوم ، وسلسلة الأكتينيوم. وكانت هناك مجموعة رابعة هي سلسلة النبتونيوم، وهي لا توجد في الطبيعة الآن نظرا لأن العمر النصفي لأطول عناصرها عمرا هو 2.2×10^{6} سنة ، وهو أقل بكثير من عمر الأرض، الذي يقدر بحوالي 3×10^{9} سنة. ويبين جدول (2–1) أهم خصائص هذه السلاسل، والمعروفة أحيانا باسم سلاسل التفكك للعناصر الثقيلة .

جدول(2–1): السلاسل الإشعاعية الطبيعية

اسم السلسلة	النواة النهائية المستقرة للمجموعة	النواة الأطول عمرا للسلسلة وعمرها النصفي بالسنوات
الثوريوم	الرصاص–208	الثوريوم–232، 1.39×10^{10}
اليورانيوم – راديوم	الرصاص–206	اليورانيوم–238، 1.47×10^{9}
الأكتينيوم	الرصاص–207	اليورانيوم–235، 8.12×10^{8}
النبتونيوم		

	بسموت−209	النيتونيوم−237، 2.2×10^{6}

وبالإضافة للسلاسل الإشعاعية الطبيعية توجد في الطبيعة بعض النظائر المشعة الأخرى مثل البوتاسيوم $^{40}_{19}K$ والساماريوم $^{147}_{62}Sm$ وغيرها. وتتميز هذه النظائر بأنها جميعا نشطة بالنسبة لإصدار جسيمات بيتا(إلكترونات)، وأعمارها كبيرة جدا (أكثر من 10^{9} سنة).

8−2 النشاط الإشعاعي المستحث The induced radioactivity

بالإضافة إلى النظائر المشعة الطبيعية تمكن العلماء من إنتاج ما يزيد على ألف وثلاثمائة نظير مشع اصطناعي. وتنتج هذه النظائر الأخيرة عن طريق قذف النظائر المستقرة بأنواع مختلفة من الجسيمات النووية مثل جسيمات ألفا والبروتونات والنيوترونات وإشعاعات جاما. وتستخدم لهذا الغرض المفاعلات النووية كمصدر للنيوترونات أو معجلات الأيونات كمصدر للجسيمات المشحونة مثل جسيمات ألفا أو البروتونات أو حتى الأيونات الثقيلة، وكذلك كمصدر لإشعاعات جاما.

فمثلا لإنتاج الكوبلت 60 وهو نظير نشط له استخدامات عديدة في مجالات مختلفة تحضر عينة من الكوبلت 59 المستقرة، ويتم تشعيع هذه العينة بالنيوترونات داخل مفاعل نووي. وعند قذف نواة الكوبلت 59 المستقر بالنيوترون تتكون نواة الكوبلت 60 ،ويصدر هذا التفاعل في نفس لحظة التفاعل فوتون جاما وفقا للتفاعل.

$$^{59}_{27}Co + n \longrightarrow {}^{60}_{27}Co + \gamma\gamma$$

ويعرف هذا التفاعل بتفاعل الأسر النيوتروني الإشعاعي (neutron radioactive capture)، حيث يتم أسر النيوترون وتتكون بذلك نواة نظير جديد مع صدور فوتون جاما عن هذا الأسر في الحال. والكوبلت 60 المتكون نظير مشع، وعمره النصفي 5.27 سنة، ويتفكك إلى النيكل 60 مصدرا جسيم بيتا السالب، أي:

$$^{60}_{27}Co \longrightarrow {}^{60}_{28}Ni + \beta^{-} + \nu'$$

ويمكن في الوقت الحالي، إنتاج المئات من النظائر المشعة الاصطناعية بهذا الأسلوب. كما يستخدم نفس الأسلوب للحصول على عناصر جديدة أثقل من اليورانيوم، وهي المعروفة باسم عناصر ما وراء اليورانيوم (Trans- uranium elements). وهذه العناصر غير موجودة في الطبيعة نظرا لأن عمرها النصفي صغير.

فمثلا عند وجود نظير اليورانيوم 238 داخل المفاعل النووي يمكن أن تأسر نواة اليورانيوم نيوترونا، فيتكون بذلك اليورانيوم 239 وهو نظير مشع يتفكك مع إصدار جسيم بيتا مكونا عنصرا جديدا هو النبتونيوم 239، وذلك كالآتي:

$$^{238}_{92}U + {}^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{239}_{92}U + \gamma$$

$$^{239}_{92}U \longrightarrow {}^{239}_{93}Np + \beta^{-} + \nu'$$

والنبتونيوم بدوره نظير مشع ويتفكك مصدرا جسيم بيتا ومكونا بذلك عنصرا جديدا هو البلوتونيوم 239

$$^{239}_{93}Np \longrightarrow {}^{239}_{94}Pu + \beta^{-} + \nu'$$

لذا ينتج نظير البلوتونيوم داخل المفاعلات بكميات كبيرة ويستخدم هذا النظير في إنتاج الطاقة وفي الأسلحة النووية. وعموما، فإنه يتم إنتاج العديد من العناصر الثقيلة كالأميريشيوم $_{95}Am$ (نسبة إلى أمريكا) والكوريوم $_{96}Cm$ (نسبة إلى السيدة ماري كوري) . والبيركيليوم $_{97}Bk$ (نسبة إلى مختبر بيركلي) والكالفورنيوم $_{98}Cf$ والأينشتينيوم $_{99}Es$ والفيرميوم $_{100}Fm$ (نسبة للعالم فيرمي) وغيرها بهذا الأسلوب نفسه.

وتجدر الإشارة إلى أن النظائر المصنعة باستخدام التشعيع النيوتروني تتفكك مصدرة الإلكترونات وذلك لزيادة نسبة النيوترونات على البروتونات.

وبالإضافة لاستخدام التشعيع النيوتروني في إنتاج النظائر المشعة فإنه يمكن إنتاج العديد من النظائر المشعة باستخدام الجسيمات المشحونة كالبروتونات وجسيمات ألفا والأيونات الثقيلة. ولهذا الغرض تعجل هذه

الجسيمات المشحونة بواسطة المعجلات النووية حتى طاقات مناسبة ثم تقذف بها النظائر المستقرة فتتكون بذلك النظائر المشعة . وتبين المعادلات التالية أمثلة لإنتاج بعض النظائر المشعة باستخدام الجسيمات المشحونة.

$$^{31}_{15}P + ^{2}_{1}d \longrightarrow ^{32}_{15}P + p$$

أي أنه عند قذف الفسفور 31 المستقر بالديوترون (نظير الهيدروجين) يتكون الفسفور 32 المشع وينطلق بروتون. كذلك، يمكن إنتاج الفلور 17 المشع كالتالي:

$$^{14}_{7}N + ^{4}_{2}He \longrightarrow ^{17}_{9}F + ^{1}_{0}n$$

ويعني هذا التفاعل الأخير أنه عند قذف النيتروجين 14 المستقر بجسيمات ألفا α يتكون الفلور 17 المشع وينطلق نيوترون. كذلك، فإنه عند قذف اليورانيوم 238 بأيون ثقيل مثل أيون الأكسجين يتكون نظير الفرميوم 250 وتخرج أربعة نيوترونات.

$$^{238}_{92}U + ^{16}_{8}O \longrightarrow ^{250}_{100}Fm + 4n$$

وعموما تستخدم تفاعلات الأيونات الثقيلة بكثرة للحصول على عناصر ما وراء اليورانيوم.

وتجدر الإشارة إلى أن إنتاج النظائر المشعة بقذفها بالنيوترونات أو الجسيمات المشحونة يتطلب وجود سيال (تيار) عال من هذه الجسيمات نظرا لأن احتمال حدوث التفاعل المعين يكون عادة صغير جدا. لذلك، يجب أن تكون كثافة التدفق النيوتروني في حدود 10^{12} حتى 10^{16} نيوترون لكل سم^2 في الثانية، تبعا لاحتمال حدوث الأسر النيوتروني في النظير المعين. وتحقق جميع المفاعلات النووية هذا المطلب. أما المعجلات فيكون عادة سيالها أقل. ويعرف احتمال حدوث التفاعل المعين بالمقطع العرضي (cross-section) وهو عبارة عن احتمال حدوث التفاعل لو قذف جسيم واحد على نواة واحدة موجودة في مساحة

مقدارها ا سم^2. ووحدة المقطع العرضي هي البارن (barn) ، وهي وحدة صغيرة تعادل مساحة مقدارها 10^{-24} سم^2 ، أي أن:

(1 بارن = 10^{-24} سم^2)

2-8-1 حساب عدد النوى المشعة المستحثة بالتشعيع

عند إنتاج النظائر المشعة بالتشعيع في مفاعل ما فإنه يجب معرفة الشدة الإشعاعية للعينة بعد التشعيع. فبعد بدء التشعيع يتراكم عدد النوى المستحثة وتبدأ بدورها في التفكك. ويكون هناك معدلان، الأول عبارة عن معدل تكوين النوى المشعة والآخر هو معدا تفككها.

وطبقا للمعادلة(2−18) فإن تغير النوى المستحثة هو:

$$dN_2 /d t = \lambda\lambda_1 N_1 - \lambda\lambda_2 N_2$$

حيث $\lambda\lambda_1 N_1$ هو عبارة عن معدل التكوين عن طريق التشعيع، $\lambda\lambda_2 N_2$ هو معدل التفكك. وحيث إن تكوين الذرات المشعة لم ينتج عن تفكك الذرة الأم ولكن ينتج عن تشعيع ذرات مستقرة فإنه يجب التعبير عن $\lambda\lambda_1 N_1$ بأسلوب آخر. ومن المعروف أن عدد الذرات النشطة N التي تتكون في الثانية بالتشعيع سوف تتناسب تناسبا طرديا مع عدد الذرات المستقرة في العينة N_{10} ومع كثافة النيترونات n (عدد النيوترونات في وحدة الحجم) ومقدار المقطع العرضي σ للأسر النيوتروني وكذلك مع سرعة النيوترونات$\nu\nu$ ،أي أن:

$$\lambda_1 N_1 = N = n\, v\, \nu\sigma\, N_{10} \qquad (2\text{-}31)$$

وبالتعويض عن $\lambda\lambda_1 N_1$ بقيمتها في العلاقة السابقة، نجد أن:

$$dN_2 / d t = n\, v\, \sigma\, N_{10} - \lambda_2 N_2 \qquad (2\text{-}32)$$

وبحل هذه المعادلة التفاضلية بالنسبة للعدد N_2 ، نجد أن:

$$N_2 = [\, n\, v\, \sigma\, N_{10} / \lambda\,]\, (1- e^{-\lambda\lambda 2t}) \qquad (2\text{-}33)$$

ويعرف الحد المحصور بين القوسين الدائريين باسم معامل نمو العينة.
فإذا كان زمن التشعيع أصغر من العمر النصفي $t_{1/2}$ نجد أن:

$$(1-e^{-\lambda_2 t}) \approx \lambda_2 t$$

وعندئذ تأخذ العلاقة (2–33) الشكل التالي:

$$N_2 = n\,v\ \sigma v N_{10}\, t$$

أما إذا استمر التشعيع لمدة طويلة (ثلاثة أضعاف العمر النصفي فأكثر) فإننا نجد أن:

$$(1-e^{-\lambda_2 t}) = 1$$

عندئذ تأخذ العلاقة (2–33) الشكل التالي:

$$N_2 = n\,v\,\sigma\,N_{10} / \lambda_2 \qquad (2\text{-}35)$$

أي أن عدد النوى المشعة في العينة يصبح ثابتا ولا يزداد العدد مهما زاد زمن التشعيع ويقال إن العينة وصلت إلى حالة التشبع. وبمعنى آخر يكون قد تحقق التوازن الأبدي. لذا، فإنه لا جدوى بعد ذلك من استمرار التشعيع لأن عدد النوى المستحثة يكون مساويا تماما لعدد النوى المتفككة. ولزيادة الشدة الإشعاعية للعينة يجب زيادة عدد الذرات المستقرة N_{10} قبل التشعيع أو زيادة كثافة النيوترونات n (أي وضع العينة في مكان تكون كثافة النيوترونات فيه أعلى).

2–9 وحدات قياس النشاط الإشعاعي Units of radioactivity

كانت الوحدة الأساسية لقياس الشدة الإشعاعية للعينة هي الكوري Courie (Ci) وأجزاؤه وهي المللي كوري (mCi) والميكروكوري(μμ Ci) وقد ارتبط الكوري تاريخيا بأنه الشدة الإشعاعية (عدد التفككات في الثانية الواحدة) لجرام واحد من الراديوم 226. وبعد معايرة الشدة الإشعاعية لجرام الراديوم وجدت أنها مساوية 3.7×10^{10} تفكك في الثانية. بذلك أصبح تعريف الكوري وأجزائه هو:

كوري واحد $1Ci = 3.7 \times 10^{10}$ تفكك في الثانية

مللي كوري $1mCi = 3.7 \times 10^{7}$ تفكك في الثانية
ميكروكوري $1\mu\mu Ci = 3.7 \times 10^{4}$ تفكك في الثانية

وينتج عن التفكك الواحد، عادة، جسيم مشحون (بيتا أو ألفا) ويصاحب ذلك في معظم الحالات وليس في كلها إصدار إشعاع أو إشعاعات جاما.

والوحدة المعيارية الدولية الآن للشدة الإشعاعية هي البكرل (Becquerel) . والبكرل عبارة عن تفكك واحد في الثانية. وبمقارنة البيكريل بالكوري نجد أنه وحدة صغير جدا. لذا، تستخدم مضاعفات البكرل وهي الكيلوبكرل والميغابكرل والغيغابكرل والتيرابكرل وقيمها كالتالي:

بيكريل واحد $1Bq = 1$ تفكك في الثانية
كيلوبيكريل $1\ K\ Bq = 10^{3}$ تفكك في الثانية
ميغابيكريل $1\ M\ Bq = 10^{6}$ تفكك في الثانية
غيغابيكريل $1\ G\ Bq = 10^{9}$ تفكك في الثانية
تيرابيكريل $1\ T\ Bq = 10^{12}$ تفكك في الثانية

وهناك وحدة ثالثة للنشاط الإشعاعي ولكنها نادرة الاستخدام وهي راذرفورد (rd) Rutherford وهي عبارة عن 10^{6} تفكك في الثانية وأجزاء الراذرفورد هي المللي والميكرو وغيرها.

10-2 أسئلة ومسائل للمراجعة

1- باستخدام جداول الكتل الذرية مع إهمال طاقة الربط للإلكترونات المدارية حدد أسلوب تفكك النظائر التالية:

${}^{225}_{88}Ra$, ${}^{228}_{88}Ra$, ${}^{230}_{89}Ac$, ${}^{234}_{92}U$, ${}^{234}_{90}Th$

2- باستخدام جداول الكتل الذرية حدد ما إذا كانت النظـائر التالية نشطة إشـعاعيا أو مسـتقرة بالنسـبة لإصـدار جسيمات ββ ، وما نوع التفكك في الحالات النشطة؟

$^{111}_{47}Ag$, $^{65}_{29}Cu$, $^{56}_{27}Co$, $^{24}_{11}Na$

3- ما هي أنواع تفكك النظائر التالية؟

$^{210}_{84}Po$, $^{241}_{95}Am$, $^{214}_{83}Bi$, $^{226}_{88}Ra$

علما بأنها جميعا نشطة بالنسبة لتفكك ألفا.

4- ما هي نواتج تفكك النظائر التالية علما بأن أسلوب التفكك مبين قرين كل نظير؟

$^{137}_{55}Cs(\beta^-)$, $^{90}_{38}Sr(\beta^-)$, $^{40}_{19}K(\beta^+,\beta^-)$, $^{22}_{11}Na(\beta^+)$

5- إذا علمت أن الفلور 21 يتفكك مع إصدار إلكترون مكونا النيون 21 وأن النيون الناتج يتكون في الحالة الأرضية، أو في الحالتين المثارتين بطاقتي إثارة 0.350 ، 1.75 ميغا إلكترون فولت. ما هي طاقـات إشـعاعات جامـا الصادرة من النيون. وما ترددها؟

6- قارن أطياف جسيمات ألفـا، وبيتـا وإشـعاعات جامـا الصادرة عن نظائر مشعة.

7- في السلاسل الإشعاعية الطبيعية ما السبب في أن تفكـك ألفا يكون متبوعا بتفكك بيتا سالب؟

8- احسب العمر النصفي لعينة مشعة من نتائج القياسات التالية:

الزمن (ساعة)	صفر	1	2	3	4	5	6	7	8
معدل العد	–	1640	1210	900	660	490	360	270	200

وما هو معدل العد بعد 15 ساعة من بدء القياسات؟.

9- لديك عينة من الكوبالت 60 عمرها النصفي 5.27 سنة.
احسب ثابت التفكك لها.
احسب الشدة الإشعاعية بالكوري والبيكريل إذا كان وزن العين عند التحضير 1 مللي جرام.
أوجد الشدة الإشعاعية لهذه العينة بعد عشر سنوات.

10 إذا كان العمر النصفي للبولونيوم 210 هو 140 يوماً، ولديك عينة محضرة حديثا وزنها 10 مللي جرام، فما هي شدة العينة عند التحضير وبعد عامين؟

11- احسب كتلة عينة شدتها 1 كوري من الكوبلت عند التحضير، إذا علمت أن العمر النصفي للكوبلت هو 5.27 سنة.

12- إذا علمت أن النيوديميوم 149 يتفكك كالتالي:

$$^{149}_{60}Nd \xrightarrow[\text{1.8 ساعة}]{} {}^{149}_{61}Pm \xrightarrow[\text{47 ساعة}]{} 149_{62}Sm$$

وأن عدد ذرات النيوديميوم المشعة عند تحضير العينة هو 10^{8} ذرة، ولا توجد أي ذرات أخرى للعناصر الوليدة.
ارسم بعد إجراء الحسابات كيفية تغير عدد كل نوع من الذرات كدالة من الزمن.

13- في لحظة معينة كانت لديك عينة نقية مقدارها 1جم من اليورانيوم 235 ، فإذا علمت أن معادلة تفكك اليورانيوم235 هي:

$$^{235}_{92}U \xrightarrow[\text{7} \times 10^{8}\text{ سنة}]{} {}^{231}_{90}Th \xrightarrow[\text{25.5 سنة}]{} {}^{231}_{91}Pa \longrightarrow {}^{227}_{89}Ac$$

احسب عدد ذرات الثوريوم231 بعد يوم، وسنة، 10^{8} سنة.

14- وضعت عينة كتلتها 2جم من الكوبلت 59 داخل مفاعل كثافة النيوترونات فيه 10^{13} نيوترون/سم^3 لمدة 24 ساعة.
أوجد الشدة الإشعاعية لهذه العينة في نهاية التشعيع إذا علمت أن المقطع العرضي لأسر النيوترونات في الكوبلت 59 هو 3 بارن وأن طاقة النيوترونات المتوسطة1 إلكترون فولت.

15- إذا علمت أن طاقة الترابط للإلكترونات بوحدة ك.إ.ف في القشرات المختلفة لذرة النحاس هي كالمبينة في الجدول التالي. احسب طاقات خطوط الأشعة السينية المميزة للنحاس.

القشرة	K	L_2	L_3	M_2	M_3
طاقة الترابط	8.980	0.953	0.933	0.077	0.075